

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

УДК 620.179

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-4-469-477>

Поступила в редакцию 07.06.2018

Received 07.06.2018

А. П. Крень¹, М. Н. Делендик², Т. А. Протасеня¹, И. Ю. Кинжагулов³¹*Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*²*Филиал Белорусского национального технического университета «Межотраслевой институт повышения квалификации и переподготовки кадров по менеджменту и развитию персонала», Минск, Беларусь*³*Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия*

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА УДАРНОГО МИКРОИНДЕНТИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ДЕФЕКТНОСТИ СТРУКТУРЫ УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. Рассматриваются вопросы измерения физико-механических характеристик углеродных материалов методом микроударного индентирования. Приводится описание конструкции датчика, создающего различную предварительную энергию для деформирования материала при проведении измерений. Показано, что датчик дает возможность провести контроль как интегральных (в большом объеме деформирования) значений твердости и модуля упругости углеродных материалов, так и значений данных характеристик для отдельных структурных составляющих композиционного углерод-углеродного материала: углеродных стержней и пека.

Приводятся результаты испытаний, подтверждающие возможность использования принятой упругопластической модели деформирования материала для оценки модуля упругости и твердости. Осуществлен переход от динамических характеристик к статическим. Проведена метрологическая аттестация образцов из таких углеродных материалов, как пирографит, силицированный графит, графит ППГ, угленаполненный фторопласт и полиамид. Показано, что метод динамического индентирования дает возможность измерять модуль упругости в диапазоне 0,5–100 ГПа и твердость индентирования в диапазоне 20–550 МПа с погрешностью, не превышающей 10 %.

Разработанная измерительная техника может применяться для установления наличия макродефектов типа «расслоение» в материалах. Показано влияние глубины залегания дефекта на измеряемые параметры.

Ключевые слова: микроиндентирование, углеродные материалы, физико-механические характеристики, неразрушающий контроль

Для цитирования. Крень, А. П. Применение метода ударного микроиндентирования для оценки механических характеристик и дефектности структуры углеродных композиционных материалов / А. П. Крень, М. Н. Делендик, Т. А. Протасеня, И. Ю. Кинжагулов // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 4. – С. 469–477. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-4-469-477>

A. P. Kren¹, M. N. Delendik², T. A. Pratasenya¹, I. Y. Kinzhagulov³¹*Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*²*Branch of the Belarusian National Technical University “Intersectoral Institute for Staff Training and Retraining on Management and Personnel Development”, Minsk, Belarus*³*Saint Petersburg National Research University of Informational Technologies Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia*

APPLICATION OF THE IMPACT MICROINDENTATION METHOD FOR ESTIMATION OF THE MECHANICAL CHARACTERISTICS AND DEFECTS OF THE STRUCTURE OF CARBON-BASE COMPOSITES

Abstract. The problems of measurement the physical and mechanical properties of carbon materials by the dynamic microindentation method are considered. The description of the gage design for measurements is given. This gage allows creating different initial energy for straining of the material tested. It is shown that the design of the gage and the device allows testing both integral (in a large volume of straining) values of the hardness and the elastic modulus, and values of these characteristics for different structural components of the carbon-carbon composites materials: carbon rods and pitch.

The obtained data confirms the possibility of using the accepted elastoplastic model of straining of the materials tested for the determination of the elastic modulus and hardness. The ratio between the dynamic and static characteristics is derived. Samples from such carbon materials as pyrolytic graphite, silicified graphite, graphite PPG, coal-filled PTFE and polyamide have been certified. Using these samples it was shown that the dynamic indentation method allows determining the elastic modulus in the range from 0.5 to 100 GPa and the hardness of indentation in the range from 20 to 550 MPa with an error not exceeding 10 %.

It is established that the developed measuring device can be used to establish the presence of defects like "delamination". The influence of the depth of the defect placement on the measured parameters is shown.

Keywords: microindentation, carbon materials, physical and mechanical characteristics, non-destructive testing

For citation. Kren A. P., Delendik M. N., Pratasenya T. A., Klnzhagulov I. Y. Application of the impact microindentation method for estimation of the mechanical characteristics and defects of the structure of carbon-base composites. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 4, pp. 469–477. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-4-469-477> (in Russian).

Введение и постановка проблемы. Углеродные материалы (УМ) находят самое широкое применение в промышленности. Характеристики УМ являются оптимальными для их использования при изготовлении изделий, эксплуатируемых в широком диапазоне температур: от криогенных до сверхвысоких, а соотношение прочность/масса для них выше, чем у металлов [1, 2]. Последнее особенно характерно для углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ), которые представляют собой композиты на основе углеродной матрицы и углеродных волокон [3]. Это дает возможность создавать облегченные конструкции, не уступающие по прочности изделиям из сталей и сплавов, при сопоставимой стоимости. Наиболее ответственной областью применения УМ является авиационная и космическая отрасль, где несоответствие характеристик материала может привести к катастрофическим последствиям. Поэтому разработка надежных неразрушающих методов контроля, с помощью которых можно было бы проводить сплошной, а не выборочный контроль продукции по физико-механическим характеристикам (например, твердости или модулю упругости), является, несомненно, важнейшей задачей, требующей практического решения.

В настоящее время одним из наиболее востребованных методов контроля является индентирование. Данный метод может применяться для оценки характеристик материалов на уровне от нано- до макро- в зависимости от значения прилагаемой нагрузки и достигаемой при этой нагрузке деформации согласно ГОСТ Р 8.748-2011 (ИСО 14577-1:2002) «Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Часть 1. Метод испытаний».

Как показывает анализ публикаций [4–6], он с успехом может использоваться для контроля как изотропных УМ, так и анизотропных структурно неоднородных УУКМ. Как правило, метод реализуется в статическом режиме: нагрузка прикладывается плавно, а закон нагружения задан заранее. Однако оборудование в этом случае требует создания замкнутой силовой системы, а для испытаний необходима вырезка образцов. Поэтому применить метод для контроля крупногабаритных изделий или изделий сложной формы довольно сложно. Устранить данный недостаток можно, применив динамическое индентирование [7], ограничением для использования которого является лишь достаточная масса изделия (как правило, более 1 кг) для исключения вибраций при микроударе. При этом более мелкие и легкие детали во избежание влияния данного мешающего фактора могут быть притерты к массивному основанию. В то же время существует ряд особенностей контроля УМ: поскольку эти материалы могут иметь характеристики, изменяющиеся в широком диапазоне, а также быть структурно неоднородными, то их свойства могут определяться как поэлементно, так и интегрально с учетом анизотропии свойств. В связи с этим для достоверной оценки характеристик необходимо выбрать оптимальные параметры индентирования, а также расчетную модель, достаточно точно описывающую процесс деформирования, что и явилось целью настоящей работы.

Метод исследования и измерительная техника. Метод динамического индентирования (МДИ) заключается в ударном внедрении жесткого индентора-бойка в материал под действием силы тяжести или придаваемого посредством принудительного разгона ударного импульса [8]. Отличительной особенностью МДИ, развиваемого в Институте прикладной физики НАН Беларуси, является возможность регистрации процесса нагружения от начала соприкосновения индентора с образцом до разрыва контакта на этапе разгрузки (рис. 1). Регистрируемые данные записываются в виде диаграммы «контактное усилие P – глубина внедрения h ». Данная диаграмма состоит из активного этапа, на котором происходит нагружение материала с начальной

предударной скоростью V_{\max} и пассивного этапа – разгрузки, по окончании которой индентор отскакивает от материала со скоростью V_{\min} . Кривая нагружения характеризует сопротивление материала ударному внедрению, и на ее ход оказывают влияние упругопластические свойства исследуемого материала. Кривая разгрузки определяется преимущественно упругим восстановлением отпечатка, образующегося под индентором диаметром D .

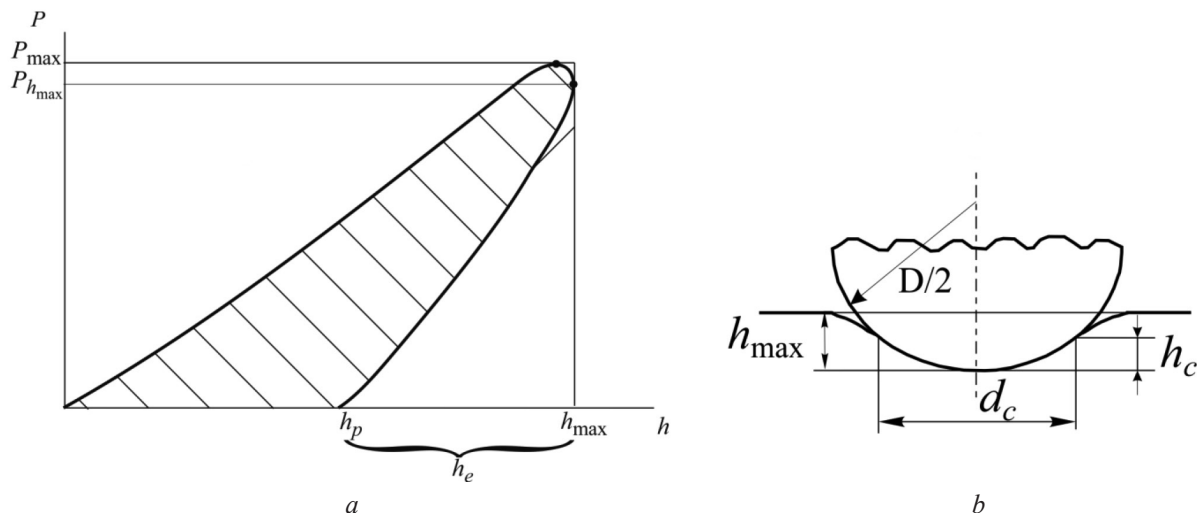


Рис. 1. Типичная диаграмма динамического вдавливания (а) и схематичное представление поперечного сечения отпечатка при деформировании материала сферическим индентором (б)

Fig. 1. Typical diagram of dynamic indentation (a) and a schematic representation of the cross section of the impression in material deformed by a spherical indenter (b)

При контроле важно, чтобы информативный объем деформируемого материала был достаточен или, наоборот, не превышал объем, необходимый для того, чтобы охарактеризовать свойства составляющих материала. Если в случае однородного изотропного УМ можно применить достаточно большой индентор, то для УУКМ желательно использовать индентор с небольшими размерами наконечника для того, чтобы охарактеризовать свойства отдельных компонентов. В связи с этим для проведения измерений МДИ был разработан прибор «ИСУМ-1» с комплектом специальных датчиков, обеспечивающих оценку механических характеристик на различных структурных уровнях (рис. 2).

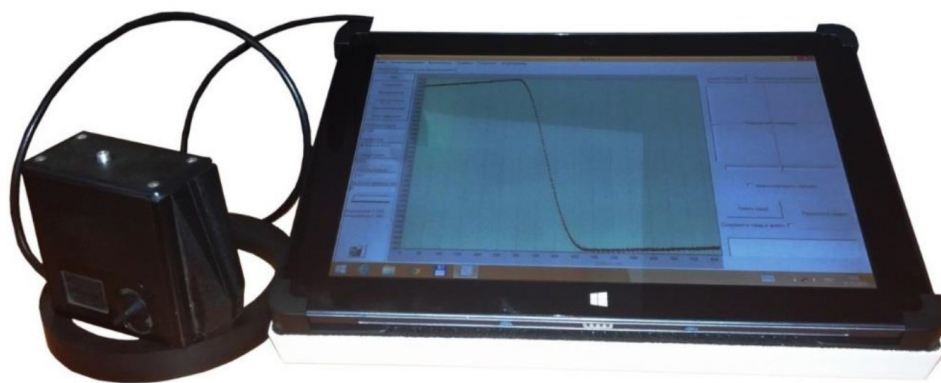


Рис. 2. Прибор «ИСУМ-1»

Fig. 2. Device “ISUM-1”

На рис. 3 приведена структурная схема основного датчика, позволяющего производить оценку механических характеристик на микроуровне. Данный датчик имеет в своем составе видеоканнеру с 20-кратным увеличением для визуализации точки контроля.

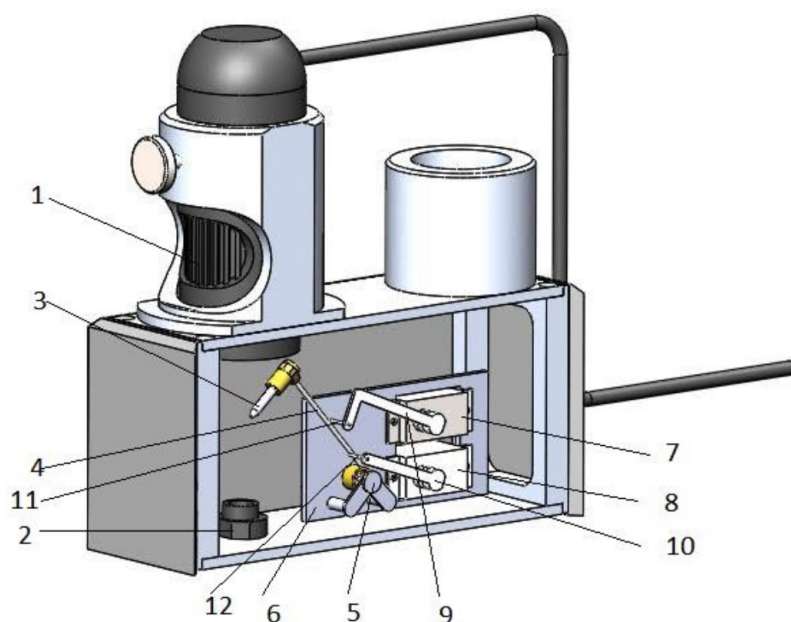


Рис. 3. Конструкция основного датчика

Fig. 3. Main gage design

Конструкция датчика включает следующие основные узлы: корпус, измерительное устройство и механизм нагружения. Измерительное устройство состоит из видеокамеры 1, датчика регистрации параметров движения 2 и индентора 3. Механизм нагружения включает в себя рычаг 4, на котором закреплен индентор; ось 5, вокруг которой вращается рычаг 4; закрепленные на опоре 6 двигатели 7 и 8 с рычагами 9, 10, упор 11 и зацеп 12. Двигатель 8, рычаг 10 и зацеп 12 предназначены для подъема рычага 4 на заданный угол; двигатель 7, рычаг 9 и упор 11 – для ограничения этого угла. При проведении измерения рычаг 10, установленный на валу двигателя 8, вращается по часовой стрелке, при этом закрепленный на рычаге 10 гибкий зацеп 12 поднимает рычаг 4 до контакта с жестким упором 11. При дальнейшем вращении рычага 10 зацеп 12 деформируется, высвобождая рычаг 4, который под действием силы тяжести вращается против часовой стрелки. Закрепленный на рычаге 4 индентор 3 наносит по изделию 13 испытательный удар. В момент удара с помощью датчика 2 регистрируется измерительный сигнал, пропорциональный скорости индентора. Обработанный по специальным алгоритмам, этот сигнал преобразуется в диаграмму $P = f(h)$ и несет в себе информацию о механических характеристиках материала.

Индентор в датчике может быть сменным. Также «ИСУМ-1» допускает применение отдельных датчиков с разными радиусами сферического наконечника для съема информации с соответствующей информативной площади и глубины. Энергия удара регулируется посредством подъема индентора на различную высоту для создания необходимой предупредной скорости V_{\max} или путем изменения массы индентора m . Обработка измерительной информации для прибора включает документирование точки контроля (фотографию поверхности) и значения присущих этой точке механических характеристик.

Материалы. В качестве материалов для исследования и определения возможности контроля их физико-механических характеристик МДИ были отобраны графиты марок ПГИ, СГП и ППГ, угленаполненный фторопласт Ф4К20, угленаполненный полиамид (УПА), а также УУКМ, имеющий структуру 4D (рис. 4). Испытания образцов проводились в рамках работ, выполняемых по программе Союзного Государства «Мониторинг-СГ». Если ПГИ, СГП, ППГ, Ф4К20 при микродеформировании можно считать изотропными однородными материалами, то УУКМ имеет более сложную структуру, состоящую из углеродных стержней, уложенных в четырех направлениях, между которыми находится связующее – углеродный пек (рис. 4). При испытаниях УУКМ для оценки характеристик углеродных стержней (в различных направлениях)

и пёка применялись сферические инденторы разных диаметров. Относительный размер информативной зоны – отпечатков под нагрузкой (S_1 , S_2 , S_3), формируемых при измерениях, показан на рис. 4. Диаметр углеродных стержней составлял 500–700 мкм.

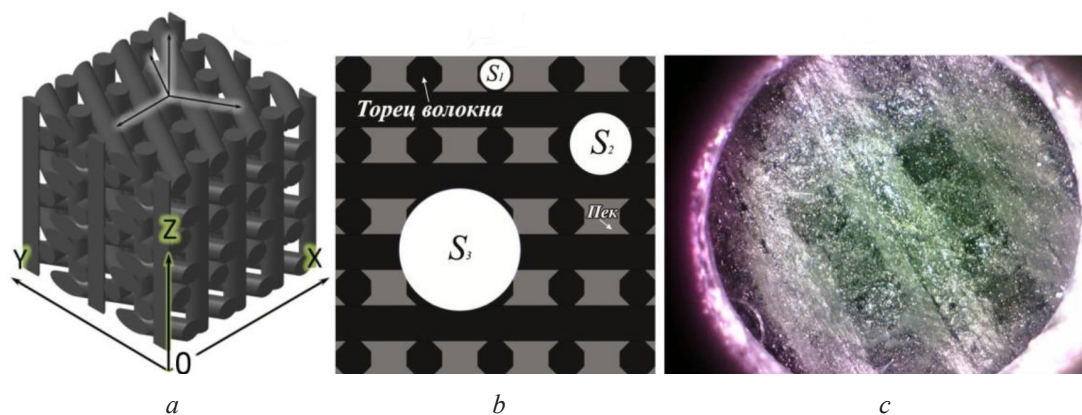


Рис. 4. Схема армирования 4D УУКМ (а), характерные размеры отпечатков (S) под нагрузкой, формируемых инденторами разных диаметров (b), изображение поверхности материала в видеокамере прибора «ИСУМ-1» (c)

Fig. 4. Reinforcement scheme (a), characteristic dimensions of impression (S) under load, formed by indenters with different diameters (b), image of the material surface in the videocamera of the device “ISUM-1” (c)

Для установления возможности контроля дефектов структуры типа «расслоение» использовался образец из волокнистого УУКМ с заложенными искусственными дефектами, прошедший термоградиентное уплотнение пиролитическим углеродом. Образец имел толщину ~10 мм. Дефект моделировался путем закладки пластин из слюды размерами 50×50 мм до операции карбонизации. Схема закладки дефектов в образцах, внешний вид образца и увеличенное изображение искусственного дефекта показаны на рис. 5.

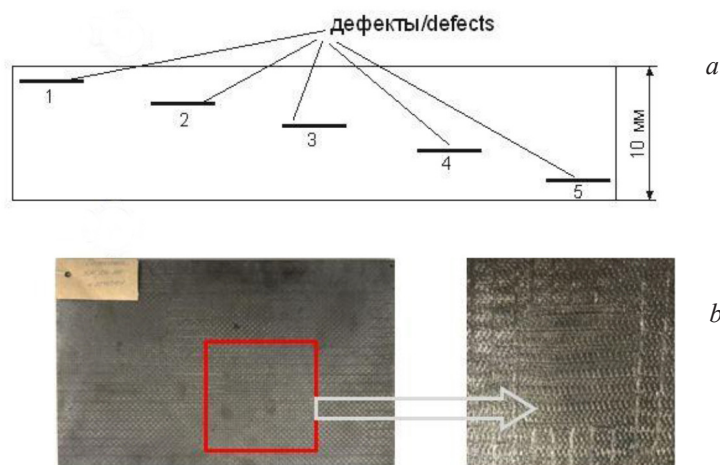


Рис. 5. Образец для испытаний: расположение дефектов (а), общий вид образца и увеличенное изображение дефектной области (b)

Fig. 5. Sample for testing: defects location (a), general view of the sample and an enlarged image of the defective area (b)

Модель деформирования и определяемые характеристики материалов. Проведенные нами исследования показали, что для описания процесса внедрения сферических инденторов в испытываемые УМ можно использовать модель упругопластического деформирования [8], которая легла в основу создания СТБ 2495-2017 «Контроль неразрушающий. Определение физико-механических характеристик конструкционных материалов методами индентирования». Согласно разработанным ранее теоретическим основам [7, 8] и в соответствии с указанным стандартом динамическая твердость H_d может быть определена по формуле

$$H_d = \frac{P_{h_{\max}}}{\pi D(h_{\max} - 0,5h_e)}, \quad (1)$$

где $P_{h_{\max}}$ – значение усилия при максимальном внедрении, h_{\max} – максимальное внедрение, h_e – упругая составляющая внедрения (см. рис. 1).

Динамический модуль упругости E_d рассчитывается согласно выражению

$$E_d = \frac{6P_{h_{\max}}^2}{5md_c V_{\min}^2}, \quad (2)$$

где d_c – диаметр контактного отпечатка (см. рис. 1).

Порядок регистрации и определения динамических твердости и модуля упругости подробно изложен в СТБ 2495-2017. При этом следует понимать, что значения динамической твердости H_d , определяемой по (1), будут зависеть от геометрических параметров индентора и при использовании разных инденторов могут несколько отличаться, однако будут иметь корреляционную связь между собой.

Эксперимент и его результаты. Получить значения H_d для изотропных УМ (например, ПГИ) не представляет сложностей. В то же время определение H_d еще не вошло в практику контроля. Общепринятыми методами являются измерение твердости по шкалам Бринелля, Роквелла, Виккерса. Однако сравнивать значения твердости УМ, полученные по разным шкалам, нельзя. Тем более что ни одна из этих шкал не может перекрыть весь диапазон изменения данной характеристики для УМ. Для сравнения полученных результатов более оптимально проводить измерения по ГОСТ Р 8.748-2011 (ИСО 14577-1:2002) «Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании» или ГОСТ 4670 (ИСО 2039-1) «Пластмассы. Определение твердости. Метод вдавливания шарика». Данные стандарты, как и СТБ 2495-2017, в части статического индентирования являются эквивалентными. Однако, как уже упоминалось, статическая схема измерения не применима для контроля реальных изделий.

В связи с этим совместно с Государственным научно-исследовательским институтом конструкционных материалов на основе графита «НИИграфит» (г. Москва, Россия) была осуществлена аттестация образцов УМ, которая позволила получить корреляционную связь между значениями H_d и твердостью H_s по ГОСТ 4670 (рис. 6, а). Также согласно аттестованной и утвержденной в установленном порядке МИ 00200851-188-2007 «Методика определения упругих и деформационных свойств углеграфитовых материалов при растяжении и сжатии» были проведены измерения статического модуля упругости E_s образцов УМ при малых деформациях. График, отражающий связь E_d и E_s , показан на рис. 6, б.

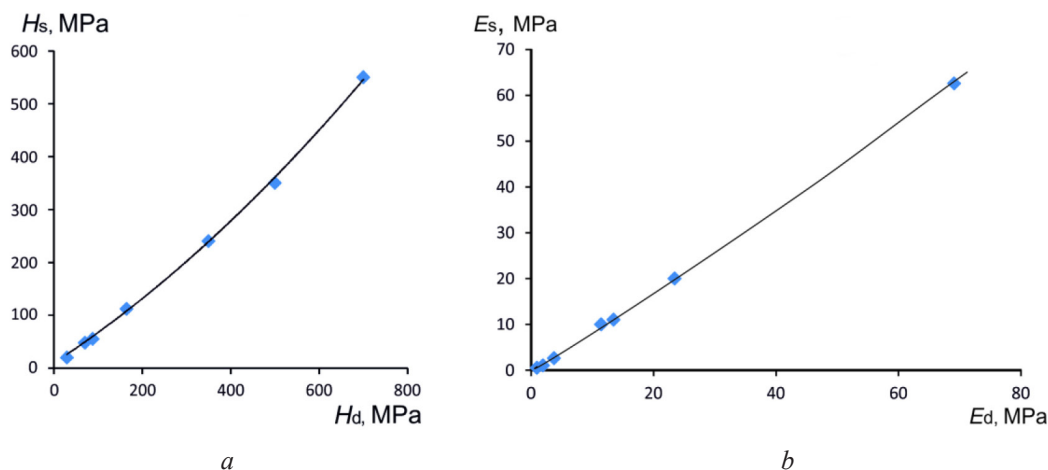


Рис. 6. Графики связи между H_d и H_s (а), а также E_d и E_s (б)
Fig. 6. Ratio between H_d and H_s (a), and ratio between E_d and E_s (b)

Как показали проведенные испытания прибора «ИСУМ-1» с использованием большого числа образцов из ПГИ, СГП, ППГ, УПА, Ф4К20 и других материалов, погрешность измерения твердости H_s и модуля упругости E_s не превысила 10 % во всем диапазоне измерения. Превышение значений E_d над E_s можно объяснить разной величиной деформации, достигаемой при индентировании и стандартных испытаниях, а также влиянием вязкоупругости для образцов в нижнем контролируемом диапазоне.

Для УУКМ проведение испытаний с использованием индентора с радиусом 1,5–5,0 мм (см. отпечатки S_2 и S_3 на рис. 4) оказалось неэффективным. При энергиях удара в диапазоне 45–100 мДж характерная анизотропия свойств по осям укладки стержней (см. рис. 4) не проявлялась. Изменение в ходе кривых нагружения и, соответственно, чувствительность к анизотропии наблюдалась только при более высоких энергиях, которые приводили к повреждению поверхности материала (продавливанию углеродных стержней и выходу пека на поверхность образца). В этом случае МДИ перестает быть полностью неразрушающим, а предлагаемую расчетную модель также нельзя использовать. Тем не менее этот метод позволяет определить характеристики отдельных компонент, которые, как показывают данные [9], изменяются в процессе изготовления материала и при его эксплуатации, что может служить дополнительным признаком его соответствия техническим требованиям.

Учитывая, что диаметр углеродных стержней не превышал 700 мкм, для контроля был изготовлен индентор с диаметром сферического наконечника 200 мкм (см. отпечаток S_1 на рис. 4). При этом во избежание влияния нижних слоев на результаты измерений энергия удара не превышала 22 мкДж. В таблице представлены значения твердости и модуля упругости, полученные при индентировании структурных элементов материала в различных плоскостях (см. рис. 4) для трех различных образцов (№ 1–3).

Значения твердости H_d и модуля упругости E_d для различных структурных составляющих УУКМ
Values of hardness H_d and modulus of elasticity E_d for various structural components of C/C composite material

Элемент структуры	№ образца	Плоскость XOY		Плоскость YOZ		Плоскость XOZ	
		H_d , ГПа	E_d , ГПа	H_d , ГПа	E_d , ГПа	H_d , ГПа	E_d , ГПа
Торец стержня	1	0,51±0,05	23,1±4				
	2	0,34±0,04	23,7±4			0,29±0,03	20,4±4
	3	0,27±0,07	28,2±8			0,23±0,05	24,4±8
Боковая поверхность стержня	1	0,48±0,04	9,97±1	0,43±0,04	9,29±1		
	2	0,42±0,03	12,7±2			0,41±0,04	10,7±2
	3	0,45±0,08	12,2±4			0,41±0,07	15,5±5
Пек	1	0,45±0,01	7,17±2	0,36±0,02	7,91±2		
	2	0,32±0,01	7,94±1			0,24±0,01	7,82±1
	3	0,23±0,05	7,39±3			0,23±0,02	8,61±3

Данные таблицы показывают, что МДИ позволяет различать характеристики элементов структуры УУКМ. При этом повышенный разброс показаний для образца № 3 может говорить о его некачественном изготовлении.

МДИ показал также свою чувствительность к макродефектам материала. Для подтверждения этого использовался образец, представленный на рис. 5. Контролируемым параметром являлась H_d . Испытания проводились с индентором из карбида вольфрама с радиусом закругления 0,5 мм, массой 5 г. Предударная скорость составляла около 0,9 м/с. Значения H_d показали существенное различие для бездефектной области и области над искусственными дефектами. При проведении эксперимента контроль проводился в режиме последовательного сканирования по поверхности с шагом 5–10 мм. Полученные результаты представлены на рис. 7 в виде поверхности, описывающей распределение значений твердости индентирования в зависимости от координат контролируемых точек объекта контроля.

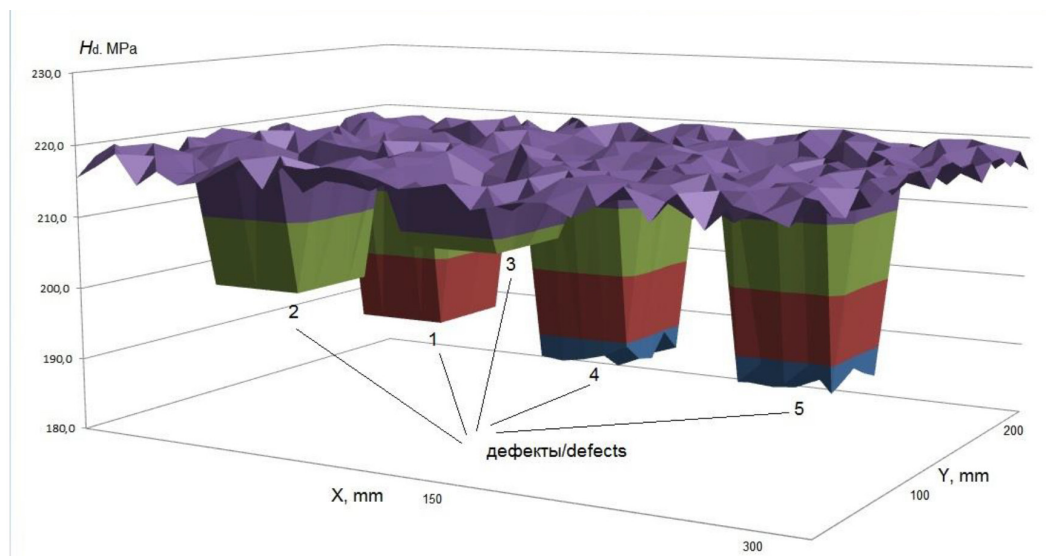


Рис. 7. Диаграмма распределения твердости по поверхности и над дефектами образца из УУКМ

Fig. 7. Distribution of hardness over the surface and over the defects of the sample produced from C/C composite material

Значения твердости, полученные в областях над искусственными дефектами, различались в зависимости от глубины залегания дефекта при наличии сквозной прошивки уложенных волокон УУКМ (дефекты 1, 2, 3) и мало изменялись, если такая прошивка отсутствовала (дефекты 4, 5), несмотря на то, что глубина закладки дефектов была различна. В случае отсутствия прошивки это свидетельствует о том, что твердость не связана с наличием дефектов, а определяется отличиями в структуре (отсутствием прошивки) и собственно свойствами материала (слюды, которая моделировала дефекты).

Заключение. Проведенные исследования позволили создать на основе метода динамического индентирования прибор «ИСУМ-1» для проведения неразрушающего контроля углеродных материалов, в том числе структурно неоднородных. Разработанная конструкция датчика прибора дает возможность изменять параметры ударного импульса и измерять свойства материала как интегрально, так и в малом объеме, характерном для отдельных структурных составляющих материала.

Показано, что метод и измерительная техника позволяют с высокой точностью оценить твердость и модуль упругости УМ. Получены характерные значения физико-механических свойств для отдельных составляющих УУКМ со структурой 4D. Установлено, что метод динамического индентирования может быть использован для поиска дефектов типа «расслоение» в УУКМ.

Список использованных источников

1. Burchell, T. D. Carbon Materials for Advanced Technologies. – Elsevier, 1999. – 540 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-042683-9.X5000-6>
2. Chung, D. Carbon Fiber Composites / D. Chung. – Butterworth-Heinemann, 2012. – 215 p.
3. Fitzer, E. Carbon Reinforcements and Carbon / E. Fitzer, L. M. Manocha. – Springer Science & Business Media, 2012. – 344 p.
4. Transverse Properties of Carbon Fibres by Nano-Indentation and Micro-mechanics / R. Maurin [et al.] // Appl. Compos. Mater. – 2008. – Vol. 15, Iss. 2. – P. 61–73. <https://doi.org/10.1007/s10443-008-9057-3>
5. Numerical evaluation of the effect of pores on effective elastic properties of Carbon/Carbon composites / X. Chao [et al.] // Composite Structures. – 2018. – Vol. 196. – P. 108–116. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.05.014>
6. Characterisation of the transverse mechanical properties of carbon/carbon composites by spherical indentation / M. Poitrimolt [et al.] // Carbon. – 2014. – № 66. – P. 234–245. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.08.063>
7. Рудницкий, В. А. Соотношение динамической и статической твердости металлов / В. А. Рудницкий, А. П. Крень, Г. А. Ланцман // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2016. – № 4. – С. 16–22.
8. Kren, A. P. Determination of the critical stress intensity factor of glass under conditions of elastic contact by the dynamic indentation method / A. P. Kren // Strength of Materials. – 2009. – Vol. 41, Iss. 6. – P. 628–636. <https://doi.org/10.1007/s11223-009-9172-x>

9. Residual compressive and thermophysical properties of 4D carbon/carbon composites after repeated ablation under oxyacetylene flame of 3000 °C / W. Zaman [et al.] // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. – 2013. – № 23. – P. 1661–1667. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(13\)62645-X](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(13)62645-X)

References

1. Burchell T. D. *Carbon Materials for Advanced Technologies*. Elsevier, 1999. 540 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-042683-9.X5000-6>
2. Chung D. *Carbon Fiber Composites*. Butterworth-Heinemann, 2012. 215 p.
3. Fitzer E., Manocha L. M. *Carbon Reinforcements and Carbon*. Springer Science & Business Media, 2012. 344 p.
4. Maurin R., Davies P., Baral N., Baley C. Transverse Properties of Carbon Fibres by Nano-Indentation and Micro-mechanics. *Applied Composite Materials*, 2008, vol. 15, iss. 2, pp. 61–73. <https://doi.org/10.1007/s10443-008-9057-3>
5. Chao X., Qi L., Cheng J., Tian W. Numerical evaluation of the effect of pores on effective elastic properties of Carbon/Carbon composites. *Composite Structures*, 2018, vol. 196, pp. 108–116. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.05.014>
6. Poitrimolt M., Cheikh M., Bernhart G., Velay V. Characterisation of the transverse mechanical properties of carbon/carbon composites by spherical indentation. *Carbon*, 2014, no. 66, pp. 234–245. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.08.063>
7. Rudnitsky V. A., Kren A. P., Lantsman G. A. Investigation of the ratio between the dynamic and static hardness of metals. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2016, no. 4, pp. 19–22 (in Russian).
8. Kren A. P. Determination of the critical stress intensity factor of glass under conditions of elastic contact by the dynamic indentation method. *Strength of Materials*, 2009, vol. 41, iss. 6, pp. 628–636. <https://doi.org/10.1007/s11223-009-9172-x>
9. Zaman W., Li K., Ikram S., Li W. Residual compressive and thermophysical properties of 4D carbon/carbon composites after repeated ablation under oxyacetylene flame of 3000 °C. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2013, no. 23, pp. 1661–1667. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(13\)62645-X](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(13)62645-X)

Информация об авторах

Крень Александр Петрович – доктор технических наук, заведующий лабораторией контактно-динамических методов контроля, Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 16, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: alekspk@mail.ru

Делендик Михаил Николаевич – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Безопасность технологических процессов и производств», филиал Белорусского национального технического университета «Межотраслевой институт повышения квалификации и переподготовки кадров по менеджменту и развитию персонала» (ул. Минина, 23, корп. 2, 220014, Минск, Республика Беларусь). E-mail: delendik@mipk.by

Протасеня Татьяна Анатольевна – научный сотрудник, Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 16, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: 5657397@gmail.com

Кинжагулов Игорь Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии интроскопии», Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Кронверкский пр., 49, 197101, Санкт-Петербург, Российская Федерация). E-mail: kizhiki@mail.ru

Information about the authors

Alexander P. Kren – D. Sc. (Engineering), Head of the Mechanical Testing Laboratory, Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus (16, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alekspk@mail.ru

Mikhail N. Delendik – Ph. D (Engineering), Head of the Chair “Safety of Technological Processes and Manufacture”, Branch of the Belarusian National Technical University “Intersectoral Institute for Staff Training and Retraining on Management and Personnel Development” (23/2, Minin Str., 220014, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: delendik@mipk.by

Tatjana A. Pratasenya – Researcher, Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus (16, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: 5657397@gmail.com

Igor Y. Kinzhagulov – Ph. D (Engineering), Assistant Professor of the Chair “Technology of Introscopy”, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (49, Kronverkskiy Ave., 197101, Saint Petersburg, Russian Federation). E-mail: kizhiki@mail.ru